

基于 AFS 的多民族人脸语义描述与挖掘方法研究

段晓东¹⁾ 李泽东^{1),2)} 王存睿^{1),2)} 张庆灵²⁾ 刘晓东³⁾

¹⁾(大连民族大学大连市民族文化数字技术重点实验室 辽宁 大连 116600)

²⁾(东北大学系统科学研究所 沈阳 110819)

³⁾(大连理工大学智能控制研究所 辽宁 大连 116600)

摘 要 该文提出了一种基于语义规则的多民族人脸特征表达方法. 该方法在公理化模糊集理论框架下建立刻画人脸特征的语义概念, 构建描绘不同民族人脸特征的语义规则集, 并根据语义贴适度及隶属度的关联性设定约简准则进行语义挖掘, 进而研究不同民族的人脸典型特征. 所提方法的特点包括: 通过多民族人脸特征数据的分布规律获取表述人脸特征的语义; 定义的逻辑运算规则能够实现人脸语义运算, 并获得描述人脸多样性特征的复杂语义; 挖掘所获的多民族人脸典型特征由具有自然语言解释的语义表述, 便于直观理解. 文中采用 C4.5、Quest、DecisionTable、NeuralNet、BayesNet、SVM 和 RA 等方法对 FEI、CK+ 以及本文所构建的“中华多民族人脸数据库”中的人脸民族属性进行了分析, 结果表明该文方法建立的语义规则集不仅能够对各民族人脸特征进行语义解释, 而且对个体人脸的民族属性具有较好的判别率, 该文方法为研究多民族的人脸语义特征规律提供了一个新途径.

关键词 多民族人脸特征; 公理化模糊集; 语义概念; 复杂语义; 语义规则集

中图法分类号 TP301 **DOI 号** 10.11897/SP.J.1016.2016.01435

Multi-Ethnic Face Semantic Description and Mining Method Based on AFS

DUAN Xiao-Dong¹⁾ LI Ze-Dong^{1),2)} WANG Cun-Rui^{1),2)} ZHANG Qing-Ling²⁾ LIU Xiao-Dong³⁾

¹⁾(Dalian Key Laboratory of Digital Technology for National Culture, Dalian Nationalities University, Dalian, Liaoning 116600)

²⁾(Institute of System Science, Northeastern University, Shenyang 110819)

³⁾(Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116600)

Abstract This paper proposes a semantic rule-based method to represent multi-ethnic facial features. In the frame of axiomatic fuzzy set theory, it builds semantic concepts to describe facial features; establishes semantic rule to express the multi-ethnic facial features; defines a criterion using semantic correlation of close degree and membership degree to mine the semantic rule; then researches the typical multi-ethnic facial features. The advantages method includes that facial semantics are obtained by the distribution of feature data; the complex semantic of facial features can be gained by operating facial semantic based on defined logical rules; the multi-ethnic facial typical features expressed by natural linguistics are easily understandable. Meanwhile, there is an analysis to facial nationality attribute based on face database of FEI, CK+ and Chinese Multi-Ethnic Face(CMEF), using C4.5, Quest, DecisionTable, NeuralNet, BayesNet, SVM and RA. The result shows that the semantic rule sets has better semantic interpretability for multi-ethnic facial feature and accuracy for individual recognition. Specially, it provides a new approach to explore regularity of multi-ethnic facial feature.

Keywords multi-ethnic facial features; axiomatic fuzzy set; semantic concepts; complex semantic; semantic rule sets

收稿日期: 2015-02-08; 在线出版日期: 2015-11-17. 本课题得到国家自然科学基金(61370146)和辽宁省科技计划项目(2013405003, 2013020026)资助. 段晓东, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 主要研究领域为模式识别、数据挖掘. E-mail: minzudigital@dlnu.edu.cn. 李泽东, 男, 1985 年生, 博士研究生, 中国计算机学会(CCF)学生会员, 主要研究方向为数据挖掘、模糊控制. E-mail: lizedong2008@163.com. 王存睿, 男, 1980 年生, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为数据挖掘、模式识别. 张庆灵, 男, 1956 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为网络控制、生物数学. 刘晓东, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为模糊控制、模式识别.

1 引 言

人脸面部特征包含民族、性别和年龄等基本属性,而民族特征是人类人脸认知过程中先于性别和年龄特征认知的最显著特征^[1-2],因此它也成为人脸识别技术的重要方向之一^[3].人脸民族特征受到遗传、地域和生活方式等诸多方面影响而客观存在,人类学研究已证实了不同族群在面部特征上客观存在差异性和多样性.如何利用计算机技术深入分析和挖掘多民族面部特征及其规律,对于推进和深化人脸识别技术和人类学研究也同样具有重要意义.

近年来,国内外许多学者从几何特征、肤色特征、整体特征、局部特征以及组合特征等不同途径对人脸民族特征开展了研究工作. Bledsoe^[4]最早利用面部几何特征之间的距离和比率,分析了白种人的面部特征; Kanade^[5]对于眼角、嘴巴和下巴等面部特征之间的几何关系,在一个自建的 20 个白种人数据库上进行了分析; Brunelli 和 Poggio^[6]通过具有 47 个样本的白人数据库,研究了人脸部件几何结构(如鼻子长度、嘴巴宽度和下巴形状等)之间的匹配关系,研究表明人脸的几何特征可以有效地判别人脸. 而 Brooks 和 Gwinn^[7]则将肤色作为人脸的重要特征,通过白人与黑人的肤色差异感知进行了分析; 张洪明等人^[8]根据人脸肤色模型对亚洲人和欧美人进行了人脸特征提取; Akbari 和 Mozaffari^[9]对南印度、澳大利亚、美拉尼西亚、非洲人的人脸肤色关系进行了验证; 另外, Anzures 等人^[10]证实了皮肤颜色对于外部照明环境高度敏感,进而肤色是常与其他面部特征融合使用、或被用于种族粗分析的主要特征. 随着 Turk 和 Pentland^[11]将主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)成功地用于人脸的眼睛、鼻、嘴等不同区域之间的整体特征分析之后,整体特征已经成为常用的人脸特征分析方法; Levine^[12]将 PCA 方法推广至缅甸人和非缅甸人的人脸特征提取, Ahmad 等人^[13]则对阿拉伯人、亚洲人、白种人的特征进行分析,均取得了较好的效果; 严和章毓晋^[14]采用 PCA、流行等方法在 CMU、UCSD 等数据库上做了基于尺度变化、光照、姿势变化等情况下的人脸特征分析. 局部特征方法的提出,降低了环境(如光照、遮挡等)对人脸特征的约束,比整体特征有较大的优势,如小波分析^[15]、局部二值化^[16]等方法均在 FERET 数据库上证明了局部特征比整体特征的优越性; 而 Fu 等人^[17]采用嵌入式地形独立

分量分析方法(embedded Topographic Independent Component Analysis, TICA)对部分中华民族表情特征进行了分析,再次表明了局部特征在人脸特征分析中具有一定的优势. 但实际应用中一些学者尝试用组合特征方法替代单一的人脸特征识别方法,如肤色特征、局部小波特征和整体特征等方法的融合使用; 如 Ding 等人^[18]采用局部纹理和全局形态描述人脸特征,采用多个人脸区域特征组合表达人脸的整体特征. 对于中国多民族人脸特征研究,段晓东等人^[19-21]早期建立了中国多民族人脸数据库,并利用 PCA, LDA 和 Gabor 等方法对部分民族的人脸特征进行了前期研究,研究表明中国的不同民族面部特征间也存在多样性.

人脸民族特征研究也属于体质人类学分支之一. 民族学与人类学学者利用人体测量学对不同民族的人脸生物特征进行度量^[22-23],分析研究不同民族人脸特征的统计差异和分布规律,并通过数据总结自然语言对民族特征的语义描述. 例如: 壮族人脸具有宽额头与眉毛较短的特点,藏族多具有长梯形脸,维吾尔族鼻直挺和眉毛浓密而弯曲^[19-21]等等. 这些语义虽然直观形象地描述了各民族特征,但在科学性和完整性上仍需深入研究: 一是语义概念描述的合理性; 二是很多隐含的人脸民族特征没有被挖掘出来. 因此建立客观合理的人脸特征语义描述和挖掘隐含的人脸民族语义特征,可深化和揭示以人体测量学为基础的人脸民族特征.

本文将人脸民族特征识别与体质人类学的相关工作做为结合点,通过定义人脸语义及其语义运算,挖掘描述不同民族人脸的语义特征. 由于模糊方法对于特征的属性具有较好的可解释性,常被应用于特征属性的自然语义描述,但传统的模糊方法需要主观定义描述特征的隶属度函数,然而合理的人脸语义特征需要根据人脸特征分布属性的规律进行构建. 本文提出的公理化模糊集^[24-26](Axiomatic Fuzzy Set, AFS)理论解决了这一问题, AFS 理论方法利用特征的分布属性构建隶属度函数,进而构建基于特征属性的语义概念,避免了主观因素产生的差异,根据数据的分布属性定义和分析不同民族的人脸语义.

本文基于 AFS 理论研究不同民族人脸特征的规律,利用多民族人脸特征属性的分布规律构建描述人脸特征的语义; 定义人脸语义逻辑运算规则对人脸语义进行计算; 构建语义挖掘算法提取不同民族的人脸语义集. 本文第 2 节介绍人脸特征的数据

属性的隶属度函数以及语义规则的逻辑运算的相关工作,并给出相关的定义;第3节介绍本文提出的人脸语义的挖掘方法和多民族人脸特征的语义描述;第4节给出本文的相关实验结果以及多民族人脸特征的语义解释;第5节是本文工作的总结和展望。

2 基于 AFS 的人脸语义描述

人脸语义是对人脸特征的一种自然语言描述。例如人脸特征的几何形态、不同器官的相对位置、情绪等显性和隐性属性的解释等等。本节首先定义了人脸语义的概念以及人脸语义的逻辑运算规则;然后根据人脸特征数据的分布属性,在 AFS 理论框架下给出了语义隶属度函数的构建方法。

2.1 人脸语义表达及语义逻辑运算

定义 1(人脸简单语义). 假设 $M = \{m'_{j,k} | 1 \leq j \leq S, 1 \leq k \leq K, 1 \leq l \leq L\}$ 为一个集合。人脸有 S 个

特征, j 表示其中第 j 个特征;若第 j 个特征由 L 种属性组成, l 表示其中的第 l 种属性;若第 l 种属性有 K 种不同的描述, k 为其中的第 k 种描述;则称 $m'_{j,k}$ 为一个人脸简单语义, M 为一个人脸简单语义集。

人脸简单语义是人脸特征的多属性、多形态量化表达。如“眼睛较大且明亮”,是一条描述眼睛特征的语义,该语义中表达了眼睛“较大”的几何形状和“明亮”的色泽等 2 个属性。

本文以文献[19-21]中的多民族人脸数据库为例,在中性表情状态下,采集壮族、藏族和维吾尔族等 3 个民族的人脸正面图像,采集对象年龄在 18~22 岁且父辈为同族,每个民族选取 200 个样本;利用提取的特征点按文献[19-21]构建表 1 所示的人脸特征,同时定义了“较大”、“非较大”、“中等”、“非中等”、“较小”和“非较小”等 6 种几何形态描述人脸特征;根据定义 1,文中的人脸简单语义可简记为 $m_{j,k}$,具体如表 1 所示。

表 1 人脸特征及其简单语义

标号	人脸特征	人脸特征形态					
		较大	非较大	中等	非中等	较小	非较小
f_1	左嘴角到左颧骨中心距离(左下脸颊)	$m_{1,1}$	$m_{1,2}$	$m_{1,3}$	$m_{1,4}$	$m_{1,6}$	$m_{1,6}$
f_2	鼻宽	$m_{2,1}$	$m_{2,2}$	$m_{2,3}$	$m_{2,4}$	$m_{2,5}$	$m_{2,6}$
f_3	嘴宽	$m_{3,1}$	$m_{3,2}$	$m_{3,3}$	$m_{3,4}$	$m_{3,5}$	$m_{3,6}$
f_4	眉内间距	$m_{4,1}$	$m_{4,2}$	$m_{4,3}$	$m_{4,4}$	$m_{4,5}$	$m_{4,6}$
f_5	鼻长	$m_{5,1}$	$m_{5,2}$	$m_{5,3}$	$m_{5,4}$	$m_{5,5}$	$m_{5,6}$
f_6	左嘴角到同侧内眼角距离(面颊长度)	$m_{6,1}$	$m_{6,2}$	$m_{6,3}$	$m_{6,4}$	$m_{6,5}$	$m_{6,6}$
f_7	左鼻孔到同侧内眼角距离(鼻沟长度)	$m_{7,1}$	$m_{7,2}$	$m_{7,3}$	$m_{7,4}$	$m_{7,5}$	$m_{7,6}$
f_8	左眼左侧到左颧骨中心距离(左上脸颊)	$m_{8,1}$	$m_{8,2}$	$m_{8,3}$	$m_{8,4}$	$m_{8,5}$	$m_{8,6}$
f_9	右眼右侧到右颧骨中心距离(右上脸颊)	$m_{9,1}$	$m_{9,2}$	$m_{9,3}$	$m_{9,4}$	$m_{9,5}$	$m_{9,6}$
f_{10}	下唇中心到下颚顶点距离(下颚宽)	$m_{10,1}$	$m_{10,2}$	$m_{10,3}$	$m_{10,4}$	$m_{10,5}$	$m_{10,6}$
f_{11}	右嘴角到右颧骨中心距离(右下脸颊)	$m_{11,1}$	$m_{11,2}$	$m_{11,3}$	$m_{11,4}$	$m_{11,5}$	$m_{11,6}$
f_{12}	两眼瞳孔间距	$m_{12,1}$	$m_{12,2}$	$m_{12,3}$	$m_{12,4}$	$m_{12,5}$	$m_{12,6}$
f_{13}	鼻孔中心点到嘴角中心点距离(人中长)	$m_{13,1}$	$m_{13,2}$	$m_{13,3}$	$m_{13,4}$	$m_{13,6}$	$m_{13,6}$
f_{14}	眉毛内侧中心到颧骨距离(上脸颊长度)	$m_{14,1}$	$m_{14,2}$	$m_{14,3}$	$m_{14,4}$	$m_{14,5}$	$m_{14,6}$
f_{15}	鼻孔两侧与眉心点夹角(鼻子-眉心角)	$m_{15,1}$	$m_{15,2}$	$m_{15,3}$	$m_{15,4}$	$m_{15,5}$	$m_{15,6}$
f_{16}	两侧颧骨中心与眉心夹角(颧骨-眉心角)	$m_{16,1}$	$m_{16,2}$	$m_{16,3}$	$m_{16,4}$	$m_{16,5}$	$m_{16,6}$
f_{17}	颌骨两侧与下颚顶点夹角(下颚轮廓弧度)	$m_{17,1}$	$m_{17,2}$	$m_{17,3}$	$m_{17,4}$	$m_{17,5}$	$m_{17,6}$
f_{18}	眉毛两外侧与鼻孔中心点夹角(面颊角)	$m_{18,1}$	$m_{18,2}$	$m_{18,3}$	$m_{18,4}$	$m_{18,5}$	$m_{18,6}$
f_{19}	眼长轴与眉长轴夹角(眼角弧度)	$m_{19,1}$	$m_{19,2}$	$m_{19,3}$	$m_{19,4}$	$m_{19,5}$	$m_{19,6}$

如表 1 中所示的人脸特征,根据人脸的对称性,人脸特征 f_1 和 f_{11} , f_8 和 f_9 是具有相同含义的人脸特征,即 f_1 和 f_{11} 表示人脸面部上脸颊, f_8 和 f_9 表示人脸面部下脸颊。

假设有 3 组关于壮族的人脸特征描述,如下所示:

语义 1. “面颊长度不窄”且“鼻沟长度非中等”;

语义 2. “鼻沟长度中等”且“上脸颊中等宽”;

语义 3. “鼻沟长度中等”且“两眼瞳孔间距中等”。

根据定义 1 以及表 1 中对应的人脸特征及人脸

简单语义,壮族的人脸特征表示如下:

语义 1. “ $m_{6,6}$ 且 $m_{7,4}$ ”;

语义 2. “ $m_{7,5}$ 且 $m_{8,4}$ ”;

语义 3. “ $m_{7,5}$ 且 $m_{12,5}$ ”。

定义 2(人脸复杂语义). 假设 $A_i = \prod m_{j,k}$ ($m_{j,k} \in M$) 表示由两个或者两个以上简单语义 $m_{j,k}$ 组合而成的语义,“ \prod ”表示 A_i 中所有简单语义 $m_{j,k}$ 之间的组合关系为“且”,并且 A_i 中任意的两个简单语义 $m_{j,h}$ 和 $m_{j,k}$ 所描述几何形态相异,则称 A_i 为一个人脸复杂

语义。

由定义 2 可知,前述的语义规则可以采用如下方式进行表达。

语义 1. “面颊长度不窄”且“鼻沟长度非中等”表达为“ $m_{6,6}m_{7,4}$ ”;

语义 2. “鼻沟长度中等”且“上脸颊中等宽”表达为“ $m_{7,5}m_{8,4}$ ”;

语义 3. “鼻沟长度中等”且“两眼瞳孔间距中等”表达为“ $m_{7,5}m_{12,5}$ ”。

定义 3(人脸复杂语义之间的“或”逻辑表达)。假设 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$ ($1 \leq i \leq n$) 为 人 脸 语 义 的 有 限 集,有 限 集 中 的 A_i 是 复 杂 人 脸 语 义,则 任 意 两 个 A_i 和 A_j ($1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n, i \neq j$) 之 间 的 组 合 关 系 为 “或”。

根据定义 3,上例中所示的壮族人脸语义规则可以表达为如下:

$$A = A_1 \vee A_2 \vee A_3 = \prod_{m \in A_1} m \vee \prod_{m \in A_2} m \vee \prod_{m \in A_3} m.$$

定义 4(人脸复杂语义集)。人脸特征的多样性,具备多个人脸复杂语义 $A_i, A_i = \prod_{m_{j,k}} (1 \leq i \leq n, m_{j,k} \in M)$ 。采用 Δ 表示人脸复杂语义集合,集合中任意两个人脸复杂语义 A_i 之间为“或”逻辑关系, Δ 表示为

$$\Delta = \left\{ \sum_{i \in I} A_i \mid A_i = \prod_{m_{j,k}} m_{j,k}, m_{j,k} \in M, I \text{ 是非空集合} \right\} \quad (1)$$

如果有 $\sum_{i \in I} (\prod_{m \in A_i} m), \sum_{j \in J} (\prod_{m \in B_j} m) \in \Delta$, 则 Δ 中 存 在 等 价 关 系 R , 满 足 Δ 中 的 语 义 集 之 间 的 逻辑运算,如下所示。

定义 5(人脸语义的“等价”逻辑关系)。假设 $\sum_{i \in I} (\prod_{m \in A_i} m), \sum_{j \in J} (\prod_{m \in B_j} m) \in \Delta$, 将 Δ/R 记为商集 Θ , 如果 $\left[\sum_{i \in I} (\prod_{m \in A_i} m) \right] R \left[\sum_{j \in J} (\prod_{m \in B_j} m) \right]$ 满足如下关系,则 认 为 $\sum_{i \in I} (\prod_{m \in A_i} m)$ 和 $\sum_{j \in J} (\prod_{m \in B_j} m) \in \Theta$ 上 存 在 “等 价 关 系”。

$$(1) \forall i \in I, \exists h \in J, \text{ 使 得 } A_i \supseteq B_h;$$

$$(2) \forall j \in J, \exists k \in I, \text{ 使 得 } B_j \supseteq A_k.$$

在 Θ 中,当 $\sum_{i \in I} (\prod_{m \in A_i} m) = \sum_{j \in J} (\prod_{m \in B_j} m)$ 时,表示 $\sum_{i \in I} (\prod_{m \in A_i} m)$ 代表的语义和 $\sum_{j \in J} (\prod_{m \in B_j} m)$ 代表的语义等价。

假设有 3 组语义分别为 $A_1 = m_{6,6}m_{7,4}, A_2 = m_{7,5}m_{12,5}$ 和 $A_3 = m_{7,5}m_{11,3}m_{12,5}$, 根据“等价”关系: $A_1 + A_2 + A_3 = m_{6,6}m_{7,4} + m_{7,5}m_{12,5} + m_{7,5}m_{11,3}m_{12,5} = m_{6,6}m_{7,4} +$

$m_{7,5}m_{12,5} = A_1 + A_2$, 即语义 A_2 与 A_3 的语义等价。

定义 6(人脸语义的“ \wedge ”和“ \vee ”逻辑运算)。 (Θ, \wedge, \vee) 是完全分配格,对于任意的 $A_i = \prod_{m \in A_i} m, B_j = \prod_{m \in B_j} m \in \Theta$, \wedge 和 \vee 的逻辑运算定义如下:

$$\sum_{i \in I} A_i \vee \sum_{j \in J} B_j = \sum_{u \in U} C_u \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} A_i \wedge \sum_{j \in J} B_j = \sum_{i \in I, j \in J} A_i \vee B_j \quad (3)$$

其中 U 是指标集 I 与 J 的不交并,对于 $u \in U$, 当 $u \in I$ 时, $C_u = A_u$; 当 $u \in J$ 时, $C_u = B_u$ 。

2.2 人脸语义集的隶属度函数

人脸语义隶属度函数是数据集中属性符合定义的人脸特征的程度描述函数。本节通过人脸特征的分布属性和分布概率,构建人脸语义隶属度函数,对人脸特征进行表达。

定义 7(语义结构)。设 X 是人脸特征属性数据集, M 是一个简单语义集; 2^M 是 M 的幂集, $\varphi: X \times X \rightarrow 2^M$ 。如果 τ 满足如下性质,则称 (M, τ, X) 为一个语义结构。

性质 1. $\forall (x_1, x_2) \in X \times X, \tau(x_1, x_2) \subseteq \tau(x_1, x_1)$ 。

性质 2. $\forall (x_1, x_2), (x_2, x_3) \in X \times X, \tau(x_1, x_2) \cap \tau(x_2, x_3) \subseteq \tau(x_1, x_3)$ 。

上述性质说明在语义结构中,语义具有可比性和传递性。性质 1 表明,对于语义 $m \in M$, 如果 x_1 属于语义 m 的隶属度大于或等于 x_2 属于语义 m 的隶属度程度,则在语义 m 对 x_1 的描述要优于对 x_2 的描述;性质 2 表明,对于每个语义 $m \in M$, 论域 X 中的元素属于 m 的程度满足传递率。

定义 8(人脸特征的语义隶属程度)。假设 (M, τ, X) 是基于人脸特征属性集 X 的一个语义结构, $A \subseteq \Theta$ 是一个复杂语义,则在语义结构 (M, τ, X) 中, $x \in X$ 属于 A 的程度,表示如下:

$$A^\tau(x) = \{y \mid y \in X, \tau(x, y) \supseteq A\} \quad (4)$$

当 $A = \prod_{m \in A} m (A \subseteq \Theta)$ 时, $A^\tau(x)$ 表示人脸特征数据集 X 中,有 $x_1, x_2 \in X, x_2$ 属于 A 的程度小于或等于 x_1 属于 A 的程度。

定义 9(人脸复杂语义隶属度的运算规则)。 (M, τ, X) 是个人脸语义结构,令 $\{\mu_\zeta(x) \mid \zeta \in \Theta\}$ 是 (Θ, \wedge, \vee) 和 (M, τ, X) 上的隶属度函数,如果有任意的语义 $\alpha, \beta \in \Theta, x \in X$, 且 α, β 之间满足“ \wedge ”和“ \vee ”逻辑运算关系,如下所示:

$$\mu_{\alpha \vee \beta} \geq \max\{\mu_\alpha(x), \mu_\beta(x)\} \quad (5)$$

$$\mu_{\alpha \wedge \beta} \leq \min\{\mu_\alpha(x), \mu_\beta(x)\} \quad (6)$$

当存在语义 $\zeta \in \Theta$, 关于语义 ζ 在样本集 X 上的隶属函数 $\mu_\zeta: X \rightarrow [0, 1]$. $\{\mu_\zeta(x) | \zeta \in \Theta\}$ 被称为关于人脸语义的“ \wedge ”和“ \vee ”逻辑运算规则 (Θ, \wedge, \vee) 和人脸语义结构 (M, τ, X) 上的隶属度函数, 并且必须满足以下条件:

(1) 若语义 $\alpha, \beta \in \Theta$, 在 (Θ, \wedge, \vee) 中, 如果 $\alpha \leq \beta$, 对于任意的 $x \in X$, 则 $\mu_\alpha(x) \leq \mu_\beta(x)$;

(2) 若有 $x \in X$, 语义 $\eta = \sum_{i \in I} (\prod_{m \in A_i} m) \in \Theta$, 如果 $A_i^r(x) = \emptyset$, 则对于所有的 $i \in I$ 有 $\mu_\eta(x) = 0$;

(3) 若有 $x, y \in X, A \subseteq M, \eta = \prod_{m \in A} m \in \Theta$, 如果 $A^r(x) \subseteq A^r(y)$, 则 $\mu_\eta(x) \leq \mu_\eta(y)$; 如果 $A^r(x) = X$, 则 $\mu_\eta(x) = 1$.

定义 10(人脸简单语义的权重函数). 假设语义 m 是数据集 X 上的一个简单语义, $x, y \in X, X \rightarrow R^+ = [0, \infty)$. 如果 ρ_m 满足以下条件, 则 ρ_m 被称为简单语义 m 对于 x 的权重函数:

(1) $\rho_m(x) = 0, A^r(x) = \emptyset, x \in X$;

(2) $\rho_m(x) \geq \rho_m(y) \Leftrightarrow A^r(x) \geq A^r(y), x, y \in X$.

本文基于 AFS 理论框架构建人脸语义隶属度函数. 假设 (Ω, F, P) 是一个概率空间, M 是 Ω 上的简单语义集, ρ_γ 是简单语义集 $\gamma \in M$ 的权重函数; 令 $X \subseteq \Omega$ 是概率空间 (Ω, F, P) 中的一个有限样本集, 如果任意 $m \in M, x \in \Omega, \{m\}^r(x) \in F$ 时, 有如下结论:

(1) $\{\mu_\zeta(x) | \zeta \in \Theta\}$ 是 (Θ, \wedge, \vee) 上一个的隶属度函数, 则对于任意人脸语义集 $\zeta = \sum_{i \in I} (\prod_{m \in A_i} m) \in \Theta$, 基于语义结构的隶属度函数和基于概率分布的隶属度函数可分别描述如下:

$$\mu_\zeta(x) = \sup_{i \in X} \inf_{\gamma \in A_i} \frac{\sum_{u \in A_i^r(x)} \rho_\gamma(u) N_u}{\sum_{u \in X} \rho_\gamma(u) N_u}, \quad \forall x \in X \quad (7)$$

$$\mu_\zeta(x) = \sup_{i \in X} \inf_{\gamma \in A_i} \frac{\int_{A_i^r(x)} \rho_\gamma(t) dp(t)}{\int_{\Omega} \rho_\gamma(t) dp(t)}, \quad \forall x \in \Omega \quad (8)$$

其中, N_u 是在样本集 X 中观察到的人脸语义次数.

(2) 对于任意 $m \in M, \rho_m$ 在 Ω 上是连续的, X 是概率空间 (Ω, F, P) 中任意的一组样本集; 对于所有的 $x \in \Omega$, 当 $|X|$ 无穷大时, 式(7)定义的隶属度函数会收敛至式(8)定义的隶属度函数.

为了能够更加清晰的刻画人脸特征, 构建如下人脸“非语义”的隶属度函数:

$$\mu_\gamma(x) = 1 - \mu_\gamma(x), \quad \forall x \in X \quad (9)$$

为此, 本文基于语义结构建立了描述不同民族人脸特征的隶属度函数, 基于语义结构的隶属度函数和基于概率空间的隶属度函数具有一致性, 其证明过程可参见文献[26]; 上述语义结构和语义运算规则等数学性质的证明可参考文献[24-25]. 文中将人脸特征数据归一化后, 利用人脸特征分布属性构建的隶属度函数与传统三角形隶属度函数为例进行了比较, 如图 1 和图 2 所示.

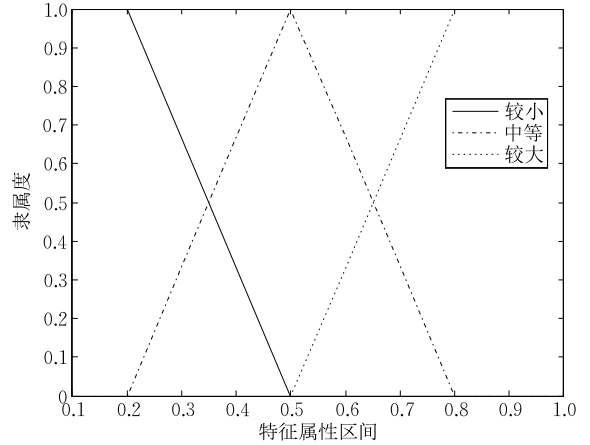


图 1 基于三角形的隶属度函数

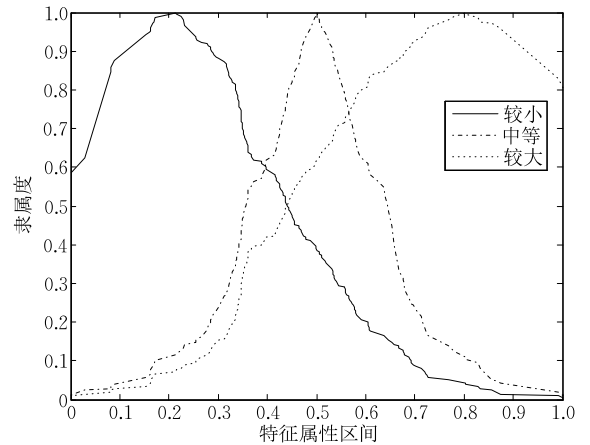


图 2 基于人脸特征分布属性的隶属度函数

AFS 理论依据特征的分布属性构建隶属度函数, 而不是主观定义隶属函数. 图 1 中的传统隶属度函数根据预先指定的模型计算隶属度, 对特征的属性进行描述, 其隶属函数具有主观性, 会由于使用者的主观认知产生差异; 图 2 中基于 AFS 理论框架构建的隶属度函数, 它通过特征的分布属性, 构建能够客观表达属性特征的隶属度函数. 当主观认知产生差异时, 本文构建的隶属度函数可以通过权重函数 ρ_m 调节不同语义的隶属度, 进而降低误差; 通过隶属度函数构建的语义可以进行逻辑规则运算, 能够更全面地刻画特征属性. 可见, 相比于传统方法, 本文

提出的方法对特征属性的描述更加客观、合理,且符合人的认知逻辑。

3 多民族人脸语义规则挖掘

本节基于人脸语义隶属度函数和人脸语义逻辑运算,挖掘不同民族的语义规则集,进而刻画各民族的人脸特征。挖掘方法分为 3 个部分:首先利用不同民族之间的差异性,挖掘个体人脸语义规则描述;其次根据相同民族人脸的相似性,采用同一民族中个体人脸语义统计表达民族人脸语义集;最后挖掘不同民族的人脸民族语义。

3.1 个体人脸语义挖掘

假设 X 为多民族人脸特征数据集,其中有 C 类民族样本, $M = \{m_{j,k} | 1 \leq j \leq S, 1 \leq k \leq K\}$ 为简单语义集。本节以第 C 类民族中的第 i 个样本为例,阐述其人脸语义挖掘方法及过程,共分 3 个步骤。

步骤 1. 构建 x_i 的简单语义集。根据样本集 X 中的人脸特征数据的分布属性,利用式(7)构建语义隶属度函数;建立简单语义评价函数 $V_{m_{j,k}}^{x_i}$, 提取个体 x_i 的人脸简单语义。

$$V_{m_{j,k}}^{x_i} = \mu_{m_{j,k}}(x_i) - \sigma_1, x_i \in X_{C_i}, 1 \leq j \leq S, 1 \leq k \leq K \quad (10)$$

其中

$$\mu_{m_{j,k}}(x_i) = \sup_{i \in X} \inf_{m \in M} \frac{\sum_{u \in m_{j,k}^+(x_i)} \rho_m(u) N_u}{\sum_{u \in X} \rho_m(u) N_u}, \forall x_i \in X_{C_i},$$

其中, $\mu_{m_{j,k}}(x_i)$ 是 x_i 在简单语义 $m_{j,k}$ 下的隶属度; σ_1 为简单语义隶属度阈值;保留描述 x_i 的简单语义中取 $V_{m_{j,k}}(x_i) \geq 0$ 对应的简单语义:

$$M_{x_i}^{\text{select}} = \{m_{j,k} | V_{j,k}(x_i) \geq 0\}.$$

人脸特征是多样的、复杂的,简单语义对人脸特征的刻画不够清晰,需要能够深入描述人脸特征多样性的复杂语义。

步骤 2. 构建 x_i 的复杂语义集。根据个体 x_i 的人脸简单语义集,建立简单语义评价函数 $V_{A_u}^{x_i}$ 挖掘个体 x_i 的人脸复杂语义。

$$V_{A_u}^{x_i} = \mu_{A_u}(x_i) - \sigma_2, \forall x_i \in X_{C_i}, A_u \subset \Theta^{x_i} \quad (11)$$

其中

$$\mu_{A_u}(x_i) = \sup_{i \in X} \inf_{m \in A_u} \frac{\sum_{u \in A_u^+(x_i)} \rho_m(u) N_u}{\sum_{u \in X} \rho_m(u) N_u}.$$

$\mu_{A_u}(x_i)$ 是 x_i 在复杂语义 A_u 下的隶属度; σ_2 为复杂语义隶属度阈值; Θ^{x_i} 表示描述 x_i 的复杂语义集,文中保留语义集中 $V_{A_u}^{x_i}(x_i) \geq 0$ 对应的复杂语义:

$$\Theta_{x_i}^{\text{select}} = \left\{ A_u^{x_i} = \prod_{m_{j,k} \in M_{x_i}^{\text{select}}} m_{j,k} \mid V_{A_u}^{x_i}(x_i) \geq 0, A_u \subset \Theta^{x_i} \right\} \quad (12)$$

文中以隶属度表示不同民族个体之间的人脸特征差异程度。以壮族训练样本集中的个体样本 x_1 为例,根据前两步过程得到其复杂语义集 $\Theta_{x_1}^{\text{select}}$, 训练集中各民族基于语义集 $\Theta_{x_1}^{\text{select}}$ 的隶属度分布如图 3 所示。

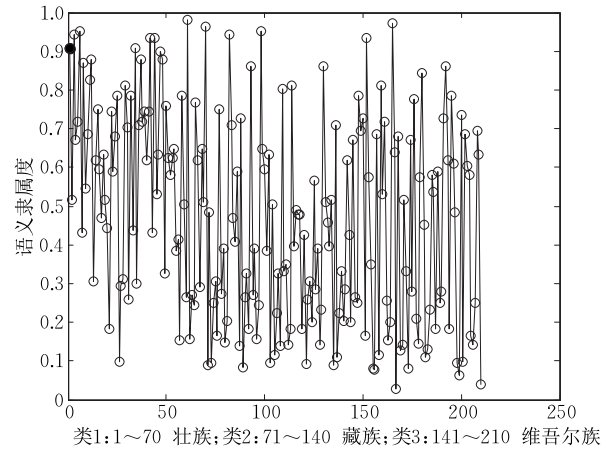


图 3 复杂语义下的多民族人脸隶属度分布

从图 3 知,在个体样本 x_1 的复杂语义集 $\Theta_{x_1}^{\text{select}}$ 描述下,藏族和维吾尔族中有部分样本的隶属度与 x_1 相同或相近,表明 $\Theta_{x_1}^{\text{select}}$ 中包含了与藏族和维吾尔族相似的人脸语义。

步骤 3. 挖掘个体 x_i 的复杂语义集 $\Theta_{x_i}^{\text{select}}$, 提取能够描述 x_i 人脸典型特征的语义集。首先构建评价函数 $R_{A_p}^{x_i}$, 如下所示:

$$R_{A_p}^{x_i} = \mu_{A_p}(x_i) - \mu_{A_p}(x_r),$$

$$\forall x_i \in X_{C_i}, x_r \notin X_{C_i}, A_p \subset \Theta_{x_i}^{\text{select}} \quad (13)$$

其中

$$\mu_{A_p}(x_i) = \sup_{i \in X} \inf_{m \in A_p} \frac{\sum_{p \in A_p^+(x_i)} \rho_m(p) N_p}{\sum_{p \in X} \rho_m(p) N_p}, \forall x_i \in X_{C_i},$$

$$\mu_{A_p}(x_j) = \max \left\{ \sup_{i \in X} \inf_{m \in A_p} \frac{\sum_{p \in A_p^+(x_j)} \rho_m(p) N_p}{\sum_{p \in X} \rho_m(p) N_p} \right\},$$

其中 $x_j \in X_{C_j}, x_j \notin X_{C_i}, X_{C_i} \cup X_{C_j} = X$; $\mu_{A_p}(x_i)$ 表示 x_i 在复杂语义 A_p ($A_p \subset \Theta_{x_i}^{\text{select}}$) 下的隶属度; $\mu_{A_p}(x_j)$ 表示在语义 A_p 描述下,数据集 X_{C_j} 中的个体 x_j 相比

较其他个体 $x_k (x_k \in X_{C_j})$ 具有最大隶属度。

然后选取 $R_{A_{\alpha}}^{x_i}$ 值较大的语义作为 x_i 人脸特征的描述,如下所示:

$$A_{x_i}^{select} = \left\{ \sum A_p \mid R_{A_p}^{x_i} \geq \alpha, A_p \subset \Theta_{x_i}^{select} \right\} \quad (14)$$

其中 α 是选择描述个体 x_i 典型人脸特征语义的阈值。

根据式(14),对图 3 中所示的壮族样本 x_1 的复杂语义集 $\Theta_{x_1}^{select}$ 进行挖掘,提取 x_1 的典型人脸语义集 $A_{x_1}^{select}$ 。在 $A_{x_1}^{select}$ 描述下, x_1 与数据集中其他样本的隶属度差异如图 4 所示。

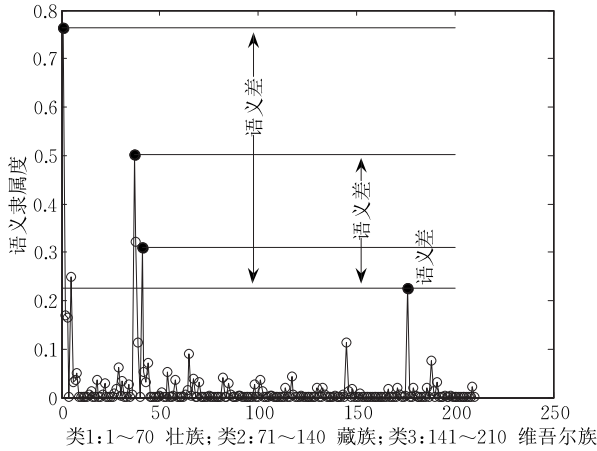


图 4 基于典型人脸语义集的多民族人脸隶属度分布

图 4 中,在语义集 $A_{x_1}^{select}$ 的描述下,个体 x_1 的隶属度高于藏族、维吾尔族中任意个体样本的隶属度,还能够刻画出个体样本 x_1 与藏族、维吾尔族中个体样本的差异,因此将其作为表达个体 x_1 人脸特征的复杂语义集。

3.2 民族人脸语义表达

根据 3.1 节,样本集中的任一样本 x_i 可用一组语义集 $A_{x_i}^{select}$ 描述。

民族人脸语义集构建. 本节将第 C_i 类民族中个体 x_i 的语义 $A_{x_i}^{select}$ 作为子集,依据人脸语义的“V”逻辑运算和“等价”逻辑关系,构建其人脸民族语义集,如式(15)所示:

$$\Theta^{C_i} = \left\{ \sum_{x_i \in X_{C_i}} A_{x_i}^{select} \mid \forall x_i \in X_{C_i} \right\} \quad (15)$$

式(15)所表示的人脸民族语义集中的复杂语义是非重复的。

经过上述的语义挖掘步骤,按照表 1 中的人脸特征及简单语义,根据文献[19-21]中壮族、藏族和维吾尔族等 3 个民族的人脸特征数据分布属性,构建出各民族的人脸语义集如表 2。并以表 2 中壮族、藏族和维吾尔族的人脸语义集为例,其隶属度分布如图 5 所示。

表 2 多民族人脸语义集

民族	复杂语义
壮族	$\{m_{1.3}m_{19.2}, m_{15.1}m_{16.3}, m_{16.3}m_{18.3}, m_{7.5}m_{16.3}, m_{6.3}m_{17.5}, m_{1.3}m_{10.1}, m_{7.3}m_{14.3}, m_{7.1}m_{10.3}, m_{8.5}m_{14.3}, m_{2.1}m_{16.3}, m_{2.4}m_{16.1}, m_{13.3}m_{17.5}, m_{4.5}m_{8.2}m_{19.2}, m_{15.4}m_{15.6}m_{17.2}, m_{3.1}m_{13.1}m_{17.5}, m_{6.5}m_{9.2}m_{13.3}, m_{9.3}m_{15.1}m_{19.5}, m_{8.2}m_{13.1}m_{18.5}, m_{8.5}m_{9.5}m_{15.1}, m_{4.3}m_{9.2}m_{10.1}, m_{7.4}m_{7.6}m_{11.6}, m_{3.4}m_{11.3}m_{14.5}, m_{3.3}m_{9.5}m_{11.1}, m_{10.1}m_{17.2}m_{17.4}, m_{2.4}m_{14.1}m_{15.1}, m_{6.3}m_{12.3}m_{16.3}, m_{1.3}m_{15.1}m_{15.6}, m_{5.5}m_{17.5}m_{18.3}, m_{7.5}m_{11.3}m_{12.5}, m_{7.1}m_{8.3}m_{13.1}, m_{7.2}m_{9.4}m_{16.1}, m_{1.3}m_{2.3}m_{4.3}, m_{1.3}m_{8.4}m_{9.3}, m_{6.6}m_{11.6}m_{19.2}, m_{6.6}m_{11.1}m_{19.2}, m_{5.4}m_{6.6}m_{19.2}, m_{3.4}m_{6.5}m_{9.5}, m_{9.5}m_{14.6}m_{16.1}, m_{3.5}m_{15.4}m_{15.6}m_{16.1}, m_{4.2}m_{7.2}m_{13.3}m_{19.3}, m_{1.6}m_{6.1}m_{14.1}m_{19.5}, m_{1.1}m_{4.3}m_{7.5}m_{10.1}, m_{8.2}m_{8.4}m_{9.3}m_{14.3}, m_{3.3}m_{15.3}m_{17.2}m_{17.4}, m_{8.5}m_{9.5}m_{12.5}m_{18.1}, m_{2.3}m_{5.3}m_{6.3}m_{16.3}, m_{8.2}m_{8.4}m_{15.4}m_{15.6}, m_{1.6}m_{2.3}m_{12.1}m_{19.5}, m_{1.6}m_{5.3}m_{16.4}m_{18.6}, m_{1.1}m_{3.4}m_{3.6}m_{4.3}, m_{10.6}m_{15.3}m_{17.2}m_{17.4}, m_{3.2}m_{3.4}m_{9.5}m_{18.1}, m_{1.3}m_{6.2}m_{6.4}m_{15.1}, m_{5.3}m_{7.3}m_{17.2}m_{17.4}, m_{1.6}m_{16.4}m_{16.6}m_{18.4}m_{18.6}, m_{6.1}m_{12.1}m_{13.4}m_{13.6}m_{17.5}, m_{4.4}m_{7.4}m_{11.6}m_{12.6}m_{14.4}m_{14.6}, m_{4.4}m_{5.6}m_{7.4}m_{11.6}m_{14.4}m_{14.6}, m_{4.4}m_{5.6}m_{7.4}m_{11.6}m_{14.4}m_{14.6}, m_{4.4}m_{4.6}m_{7.4}m_{11.6}m_{12.6}m_{14.4}, m_{4.4}m_{4.6}m_{7.4}m_{11.6}m_{14.4}, m_{4.6}m_{6.6}m_{7.4}m_{7.6}m_{12.6}m_{17.5}\}$
藏族	$\{m_{6.3}m_{14.3}, m_{3.5}m_{7.3}, m_{8.1}m_{11.3}, m_{8.1}m_{17.1}, m_{7.3}m_{15.3}, m_{1.5}m_{16.5}, m_{3.3}m_{11.3}, m_{8.1}m_{12.3}, m_{14.3}m_{17.1}, m_{1.5}m_{13.3}, m_{3.3}m_{17.6}, m_{8.1}m_{17.6}, m_{8.3}m_{17.4}m_{17.6}, m_{17.6}m_{18.4}m_{18.6}, m_{3.1}m_{9.1}m_{18.6}, m_{1.5}m_{5.3}m_{7.3}, m_{5.1}m_{12.3}m_{19.3}, m_{4.4}m_{17.1}m_{19.5}, m_{1.5}m_{2.1}m_{13.1}, m_{8.4}m_{8.6}m_{13.3}, m_{6.3}m_{17.4}m_{17.6}, m_{3.1}m_{9.1}m_{18.1}, m_{3.3}m_{6.3}m_{8.3}, m_{2.4}m_{2.6}m_{16.5}, m_{1.5}m_{2.1}m_{12.3}, m_{4.5}m_{9.1}m_{19.2}, m_{4.4}m_{14.3}m_{16.5}, m_{1.5}m_{13.1}m_{19.5}, m_{17.4}m_{17.6}m_{19.5}, m_{3.3}m_{4.1}m_{9.1}, m_{3.1}m_{8.1}m_{18.1}, m_{2.1}m_{8.1}m_{17.3}, m_{5.1}m_{11.3}m_{12.3}, m_{4.4}m_{17.1}m_{19.2}, m_{8.4}m_{9.6}m_{13.3}, m_{3.3}m_{7.1}m_{16.5}, m_{17.1}m_{18.4}m_{18.6}, m_{9.4}m_{12.3}m_{16.2}, m_{9.1}m_{19.2}m_{19.4}, m_{4.2}m_{4.4}m_{19.5}, m_{2.1}m_{9.4}m_{13.1}, m_{2.3}m_{13.3}m_{9.1}, m_{3.1}m_{8.1}m_{18.6}, m_{1.2}m_{1.4}m_{16.2}m_{18.5}, m_{2.1}m_{9.4}m_{9.6}m_{17.3}, m_{5.1}m_{8.6}m_{9.4}m_{9.6}m_{19.6}\}$
维吾尔族	$\{m_{2.5}m_{11.5}, m_{2.5}m_{13.5}, m_{1.5}m_{13.5}, m_{7.5}m_{11.5}, m_{1.2}m_{6.4}m_{11.2}, m_{6.2}m_{6.4}m_{11.2}m_{11.4}, m_{4.3}m_{11.5}, m_{2.3}m_{13.2}, m_{11.3}m_{19.3}, m_{1.2}m_{14.2}m_{14.4}, m_{10.3}m_{11.2}m_{13.5}, m_{1.4}m_{2.2}m_{14.2}, m_{13.2}m_{13.4}m_{19.6}, m_{13.2}m_{13.4}m_{19.1}, m_{5.5}m_{13.5}m_{15.3}, m_{2.2}m_{9.3}m_{15.4}, m_{13.5}m_{14.1}, m_{3.5}m_{19.4}m_{19.6}, m_{5.1}m_{13.2}m_{13.4}, m_{8.3}m_{10.3}m_{11.5}, m_{2.2}m_{2.4}m_{7.1}, m_{9.3}m_{19.4}m_{19.6}, m_{4.5}m_{9.3}m_{14.5}, m_{13.2}m_{17.5}m_{19.6}, m_{10.5}m_{12.2}m_{12.4}m_{19.1}, m_{8.5}m_{11.5}m_{18.3}, m_{3.2}m_{3.4}m_{17.3}, m_{1.5}m_{2.2}m_{11.5}m_{14.2}, m_{1.2}m_{10.3}m_{18.3}, m_{10.5}m_{17.6}m_{19.1}, m_{10.5}m_{12.2}m_{12.4}m_{15.5}, m_{5.5}m_{7.3}m_{11.2}, m_{12.2}m_{12.4}m_{13.2}m_{15.5}, m_{1.2}m_{6.5}m_{17.3}, m_{1.5}m_{12.5}m_{18.1}, m_{5.4}m_{15.3}m_{17.1}, m_{2.5}m_{3.3}m_{6.5}, m_{2.5}m_{3.2}m_{3.4}m_{18.5}, m_{8.3}m_{19.4}m_{19.6}, m_{10.3}m_{13.2}m_{13.4}m_{18.3}, m_{4.1}m_{4.6}m_{5.5}m_{5.6}m_{12.6}, m_{3.5}m_{10.6}m_{11.2}, m_{10.2}m_{10.4}m_{11.5}, m_{5.5}m_{6.2}m_{10.2}m_{10.4}, m_{5.2}m_{5.4}m_{16.5}m_{18.2}, m_{5.5}m_{6.4}m_{10.2}m_{10.4}, m_{5.1}m_{16.3}m_{17.3}, m_{4.1}m_{4.6}m_{8.5}m_{11.1}, m_{5.1}m_{10.1}m_{19.5}, m_{4.3}m_{7.4}m_{7.6}m_{15.5}, m_{4.1}m_{4.4}m_{10.6}m_{11.6}, m_{5.6}m_{10.1}m_{15.4}m_{16.3}, m_{5.4}m_{5.6}m_{10.4}m_{10.6}m_{11.4}m_{11.6}, m_{15.2}m_{17.3}m_{18.5}m_{19.1}, m_{5.1}m_{11.3}m_{14.4}, m_{1.2}m_{1.4}m_{7.2}m_{7.4}m_{8.3}, m_{6.3}m_{16.5}m_{17.6}, m_{4.1}m_{10.1}m_{14.4}m_{14.6}, m_{1.5}m_{2.3}m_{6.5}m_{12.5}, m_{7.1}m_{8.4}m_{8.6}m_{15.2}m_{18.1}, m_{4.3}m_{8.6}m_{17.6}m_{18.1}, m_{4.3}m_{5.4}m_{18.4}m_{18.6}, m_{1.3}m_{15.3}m_{17.1}m_{19.3}, m_{4.5}m_{15.6}m_{18.1}, m_{4.3}m_{5.4}m_{5.6}m_{18.4}, m_{4.3}m_{5.4}m_{6.6}m_{18.6}, m_{7.3}m_{18.2}m_{18.4}m_{19.1}, m_{9.2}m_{11.4}m_{11.6}m_{12.3}m_{16.1}, m_{1.1}m_{8.3}m_{10.6}m_{18.3}\}$

由图 5 可知,在壮族、藏族和维吾尔族人脸语义集的描述下,任一民族中的样本隶属度要高于其他两个民族中个体样本的隶属度,且能够分辨出样本

集中个体的民族属性,表明挖掘的人脸民族语义集能够表达对应民族的人脸特征。

根据 3.1 节和 3.2 节中的内容,多民族人脸语

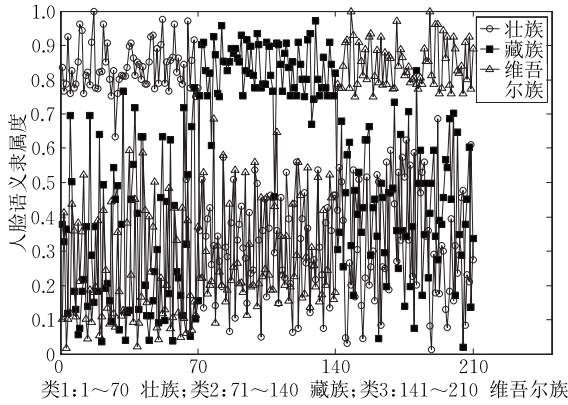


图5 多民族人脸语义集的隶属度分布

义规则的挖掘方法,如算法1所示。

算法1. 多民族人脸语义规则集挖掘算法。

输入: $\mathbf{X}: N \times S$ 矩阵, N 个人脸特征数据样本, S 个人脸特征; σ_1 为筛选人脸简单语义阈值; σ_2 为筛选人脸复杂语义阈值; $\mathbf{P}_j = [p_1, p_2, \dots, p_k] (1 \leq j \leq S)$, 其中 p_k 表示划分人脸特征的语义结点值, j 表示人脸的第 j 个特征, k 表示将第 j 个特征划分为 k 种语义描述; ρ_j 表示任意一个人脸特征在特征集中的权重

输出: Θ^{C_i} 为第 C_i 类民族的人脸语义规则集

1. 根据 \mathbf{P}_j 中的元素值 p_k , 利用式(7)和式(9), 产生描述不同特征 f 的简单语义及其对应的“非”语义, 人脸特征的简单语义集为 $M = \{\sum m_s | 1 \leq s \leq 2kS\}$;
2. 提取样本 X_i 的人脸简单语义集 $M_{x_i}^{\text{select}}$;
3. FOR $s = 1 : 1 : 2kS$
4. IF $\mu_{m_s}(x_i) - \sigma_1 \geq 0$
5. $M_{x_i}^{\text{select}}\{\text{end}+1\} = m_s$
6. END IF
7. END FOR
8. 根据定义4, 利用样本 X_i 的人脸简单语义集 $M_{x_i}^{\text{select}}$ 中的简单语义, 构建描述 X_i 的人脸复杂语义集 Θ^{x_i} ;
9. 从 Θ^{x_i} 筛选刻画样本 X_i 的人脸复杂语义 $\Theta_{x_i}^{\text{select}}$;
10. FOR $u = 1 : 1 : \text{length}(\Theta^{x_i})$
11. IF $\mu_{A_u}(x_i) - \sigma_2 \geq 0 // A_u = \{\sum m_s | m_s \in M_{x_i}^{\text{select}}\}$
12. $\Theta_{x_i}^{\text{select}}\{\text{end}+1\} = A_u$
13. END IF
14. END FOR
15. 提取 $\Theta_{x_i}^{\text{select}}$ 中 X_i 的最佳描述 $A_{x_i}^{\text{select}}$; $A_{x_i}^{\text{select}} = \max\{R_{A_u}^{x_i}\}$, 其中 $R_{A_u}^{x_i} = \mu_{A_u}(x_i) - \mu_{\max}$, $\mu_{\max}(x_r) = \max\{\mu_{A_u}(x_r) | x_r \notin X_i\}$;
16. $\Theta^{C_i} = \sum A_{x_i}^{\text{select}} = A_{x_1}^{\text{select}} \vee A_{x_2}^{\text{select}} \vee \dots \vee A_{x_i}^{\text{select}} (x_i \in X_{C_i})$

3.3 民族人脸语义约简

本节根据各民族人脸语义规则的判别率设置人脸特征覆盖率 η , 对人脸语义规则集进行约简, 提取

不同范围的各民族人脸的典型语义特征。

3.2 节构建的各民族人脸语义集中包含的人脸语义规则数较多, 不利于表达具有民族特点的人脸主要特征, 构建如下人脸语义集的约简准则:

$$\begin{cases} F(X_C) \geq \eta \\ \text{s. t. } N(X_{C_i}) = \min(N_{C_i}(A_v)) \end{cases} \quad (16)$$

其中 $F(X_C) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^C N_{C_i} \times T(X_{C_i})$ 为 人 脸 特 征 覆 盖 率, 其中 C 表示民族的类别, $T(X_{C_i})$ 表示第 C_i 类民族的判别率, N 表示样本总数, N_{C_i} 表示第 C_i 类民族的样本数; 约束条件中 $N_{C_i}(A_v)$ 表示第 C_i 类民族人脸语义集中符合人脸特征覆盖率的语义规则数; A_v 表示第 i 类民族人脸语义集中的任意一条语义规则。

本文通过构建的语义评价函数 ω , 对各民族语义规则集 Θ^{C_i} 中的语义 A_v 进行分析, 并提取评价函数数值较高的语义规则 A_v , 构建多民族人脸主要特征的语义规则集, 如下所示:

$$\omega(A_v) = \rho(A_v) \cdot \sigma^*(\mu_{A_v}(X_{C_i}), \bar{\mu}_{\Theta^{C_i}}(X_{C_i})), \quad A_v \subset \Theta^{C_i} \quad (17)$$

其中, $\rho(A_v)$ 表示语义 A_v 在语义集 Θ^{C_i} 中的权重, 如下所示:

$$\rho(A_v) = \frac{\sum_{i \in C_i} \mu_{A_v}(x_i)}{\sum_{A_v \in \Theta^{C_i}} \sum_{i \in C_i} \mu_{A_v}(x_i)}, \quad A_v \subset \Theta^{C_i}, x_i \in X_{C_i} \quad (18)$$

$$\mu_{A_v}(x_i) = \sup_{i \in C_i} \inf_{m \in A_v} \frac{\sum_{u \in A_v^c(x_i)} \rho_m(u) N_u}{\sum_{u \in X_{C_i}} \rho_m(u) N_u}, \quad \forall x_i \in X_{C_i},$$

$\sigma^*(\mu_{A_v}(X_{C_i}), \bar{\mu}_{\Theta^{C_i}}(X_{C_i}))$ 表示语义 A_v 对于语义集 Θ^{C_i} 的贴 近 度, 如 式 (19) 所 示:

$$\sigma^*(\mu_{A_v}(X_{C_i}), \bar{\mu}_{\Theta^{C_i}}(X_{C_i})) = \frac{1}{2} [\mu_{A_v}(X_{C_i}) \circ \bar{\mu}_{\Theta^{C_i}}(X_{C_i}) + (1 - \mu_{A_v}(X_{C_i})) \otimes \bar{\mu}_{\Theta^{C_i}}(X_{C_i})] \quad (19)$$

贴 近 度 分 别 采 用 语 义 内 积 和 语 义 外 积 进 行 计 算, 即

语义内积表示为

$$\mu_{A_v}(X_{C_i}) \circ \bar{\mu}_{\Theta^{C_i}}(X_{C_i}) = \bigvee_{x \in X_{C_i}} [\mu_{A_v}(X_{C_i}) \wedge \bar{\mu}_{\Theta^{C_i}}(X_{C_i})].$$

语义外积表示为

$$\mu_{A_v}(X_{C_i}) \otimes \bar{\mu}_{\Theta^{C_i}}(X_{C_i}) = \bigwedge_{x \in X_{C_i}} [\mu_{A_v}(X_{C_i}) \vee \bar{\mu}_{\Theta^{C_i}}(X_{C_i})],$$

其中的 $\mu_{A_v}(X_{C_i})$ 和 $\bar{\mu}_{\Theta^{C_i}}(X_{C_i})$ 表示如下:

$$\mu_{A_v}(X_{C_i}) = [\mu_{A_v}(x_1), \mu_{A_v}(x_2), \dots, \mu_{A_v}(x_i), \dots, \mu_{A_v}(x_{N_i})],$$

$$\begin{aligned} \bar{\mu}_{\theta^{C_i}}(X_{C_i}) = & [\bar{\mu}_{\theta^{C_i}}(x_1), \bar{\mu}_{\theta^{C_i}}(x_2), \dots, \bar{\mu}_{\theta^{C_i}}(x_i), \dots, \bar{\mu}_{\theta^{C_i}}(x_{N_i})], \\ \bar{\mu}_{\theta^{C_i}}(x_i) = & \sum_{A_v \in \theta^{C_i}} \mu_{A_v}(x_i) / N_i, \end{aligned}$$

其中 $1 \leq i \leq N_i$, $x_i \in X_{C_i}$; N_i 表示样本集 X 中, 第 C_i 类民族样本的数量. 根据式(16)评价不同民族人脸语义集中的语义 A_v , 选择能够合理表达各民族人脸主要特征的子语义集.

多民族人脸语义规则集约简算法, 如算法 2 所示.

算法 2. 多民族语义约简算法.

输入: θ^{C_i} : 各民族人脸语义规则集; η : 人脸语义覆盖率

输出: $\bar{\theta}^{C_i}$: 描述各民族典型人脸特征的语义集

1. FOR $i=1:1:N_i$;
2. FOR $v=1:1:\text{length}(\theta^{C_i})$
3. 根据式(18)计算 A_v 在 θ^{C_i} 中的权重 ρ ; // $A_v \in \theta^{C_i}$
4. 利用式(19)计算 A_v 在 θ^{C_i} 中的贴进度 σ^* ;
5. $\omega_v(A_v) = \rho \times \sigma^*$;
6. END FOR
7. **location** = *sort*($\omega(A_v)$); // 对 ω_v 中的元素进行降序排列
8. 按顺序抽取 **location** 中序号对应的人脸复杂语义;
9. 选择判别率 *Accuracy* $\geq \eta$ 的子语义规则集 $\bar{\theta}^{C_i}$;
10. END FOR
11. Return $\bar{\theta}^{C_i}$

4 结果及分析

本文采用文献[19-21]中的壮族、藏族和维吾尔族等 3 个民族的人脸特征数据, 通过归一化处理后对各民族的人脸特征语义进行分析; 利用式(7)构建语义隶属度函数, 其中语义 m 的权重函数取 $\rho_m(x) = 1$, 即任意 $x \in X$ 属于语义 m 的权重相同; 参数 σ_1 取值为 0.8, σ_2 取值为 0.75, α 取评价函数 $R_{A_u}^{x_i}$ 的最大值.

文中根据壮族、藏族和维吾尔族人脸特征覆盖率 η 的不同, 进行人脸民族特征的挖掘, η 分别取值 75%、70% 和 65%; 本文共进行 10 次实验, 每次实验中, 各民族的人脸特征数据集分别取 140 组数据做训练集, 余下的 60 组数据做测试集.

4.1 民族人脸语义规则集约简分析

利用多民族人脸语义集的约简准则, 对壮族、藏族和维吾尔族的人脸语义集进行约简, 各民族的人脸语义规则数和人脸特征覆盖率的关系如图 6 所示. 其中图 6(a)描述了根据本文约简方法对壮族、藏族和维吾尔族的人脸语义规则集的约简过程, 随着各民族人脸语义规则数的减少, 人脸特征覆盖率

逐渐降低, 并依次约简人脸语义规则集, 进而保留刻画各民族人脸主要特征的语义; 图 6(b)中利用随机数抽取与图 6(a)所示的约简方法等规则数的语义规则集, 与图 6(a)中本文约简方法相比较, 随机抽取的语义规则集对于人脸民族属性的覆盖率明显低于本文约简方法, 具体如表 3 所示. 其中随机-1~4 是分别利用随机数生成与本文方法等规则数的语义规则集及其相应的覆盖率, 且每次随机抽取 10 组语义规则集. 由表 3 中结果可知, 采用本文约简方法得到的各民族典型人脸特征语义规则的覆盖率平均高于随机抽取的语义规则覆盖率 10.93%.

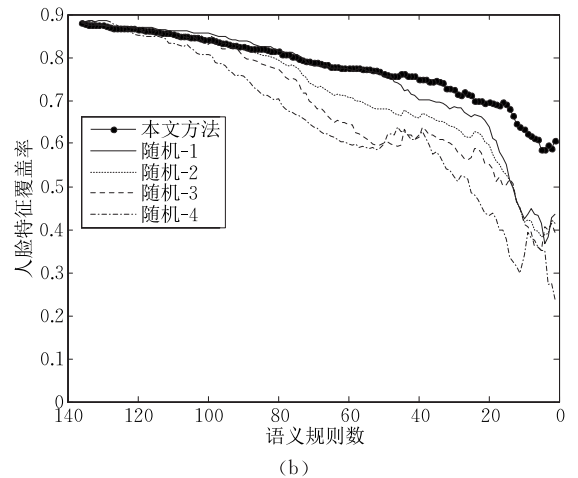
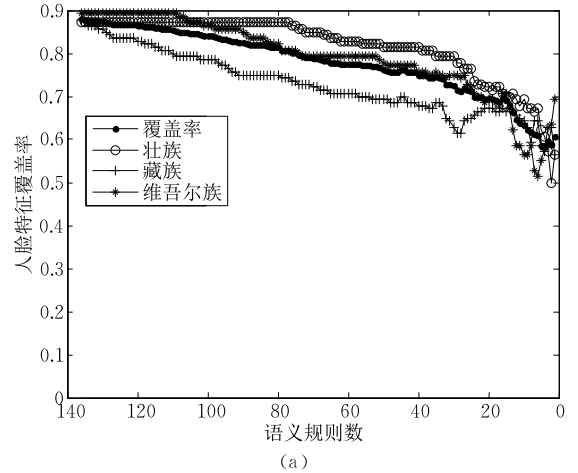


图 6 多民族人脸语义覆盖率与语义规则数量关系

表 3 不同语义规则集下人脸特征覆盖率 (单位: %)

约简	语义规则数		
	1	13	24
本文方法	60.71	66.43	70.00
随机-1	42.38	62.14	62.86
随机-2	55.48	58.81	63.57
随机-3	45.48	52.38	59.52
随机-4	43.81	53.10	57.86
平均随机	46.79	56.61	60.95

基于不同的人脸特征覆盖率 η 和规则数,文中提取了描述壮族、藏族和维吾尔族人脸主要特征的语义规则,如表 4 所示。

由表 4 中结果可知,随着人脸特征覆盖率 η 的

提高,表达壮族、藏族和维吾尔族人脸典型特征的语义规则数随之增加。如当“ $65\% \geq \eta \geq 60\%$ ”、“ $70\% \geq \eta \geq 65\%$ ”和“ $75\% \geq \eta \geq 70\%$ ”时,各民族人脸典型特征语义规则数分别为 1 条、13 条和 24 条。

表 4 不同人脸特征覆盖率下的多民族人脸语义规则数

η	人脸语义规则					
	壮族	规则数	藏族	规则数	维吾尔族	规则数
$65\% \geq \eta \geq 60\%$	$A_1 = m_{8,2}m_{17,2}$	1	$A_1 = m_{16,5}m_{17,5}$	1	$A_1 = m_{16,3}m_{19,1}$	1
$70\% \geq \eta \geq 65\%$	$A_1 = m_{8,2}m_{17,2}; A_2 = m_{8,5}m_{17,2}; A_3 = m_{1,3}m_{8,5}; A_4 = m_{9,5}m_{17,5}; A_5 = m_{9,2}m_{19,4}; A_6 = m_{1,3}m_{7,3}; A_7 = m_{9,5}m_{18,5}; A_8 = m_{1,6}m_{17,2}; A_9 = m_{1,1}m_{17,2}; A_{10} = m_{7,3}m_{11,3}; A_{11} = m_{6,3}m_{8,5}; A_{12} = m_{11,3}m_{13,3}; A_{13} = m_{1,1}m_{17,5}$	13	$A_1 = m_{16,5}m_{17,5}; A_2 = m_{2,6}m_{6,1}; A_3 = m_{2,1}m_{6,1}; A_4 = m_{8,3}m_{10,3}; A_5 = m_{6,3}m_{11,5}; A_6 = m_{3,6}m_{4,3}; A_7 = m_{2,3}m_{11,5}; A_8 = m_{3,1}m_{4,3}; A_9 = m_{8,3}m_{15,5}; A_{10} = m_{14,3}m_{16,4}; A_{11} = m_{3,3}m_{11,5}; A_{12} = m_{9,3}m_{19,5}; A_{13} = m_{6,5}m_{8,3}$	13	$A_1 = m_{16,3}m_{19,1}; A_2 = m_{2,5}m_{19,3}; A_3 = m_{9,3}m_{19,3}; A_4 = m_{7,3}m_{18,3}; A_5 = m_{5,3}m_{17,3}; A_6 = m_{5,3}m_{18,3}; A_7 = m_{13,3}m_{19,3}; A_8 = m_{1,5}m_{2,5}; A_9 = m_{13,3}m_{18,3}; A_{10} = m_{11,5}m_{17,3}; A_{11} = m_{2,5}m_{10,5}; A_{12} = m_{11,5}m_{19,1}; A_{13} = m_{2,5}m_{15,5}$	13
$75\% \geq \eta \geq 70\%$	$A_1 = m_{8,2}m_{17,2}; A_2 = m_{8,5}m_{17,2}; A_3 = m_{1,3}m_{8,5}; A_4 = m_{9,5}m_{17,5}; A_5 = m_{9,2}m_{19,4}; A_6 = m_{1,3}m_{7,3}; A_7 = m_{9,5}m_{18,5}; A_8 = m_{1,6}m_{17,2}; A_9 = m_{1,1}m_{17,2}; A_{10} = m_{7,3}m_{11,3}; A_{11} = m_{6,3}m_{8,5}; A_{12} = m_{11,3}m_{13,3}; A_{13} = m_{1,1}m_{17,5}; A_{14} = m_{1,6}m_{17,5}; A_{15} = m_{1,1}m_{19,5}; A_{16} = m_{6,3}m_{8,4}; A_{17} = m_{9,5}m_{13,5}; A_{18} = m_{11,3}m_{18,5}; A_{19} = m_{4,3}m_{11,3}; A_{20} = m_{4,5}m_{8,5}; A_{21} = m_{5,3}m_{8,5}; A_{22} = m_{10,3}m_{11,3}; A_{23} = m_{9,4}m_{13,3}; A_{24} = m_{7,3}m_{19,5}$	24	$A_1 = m_{16,5}m_{17,5}; A_2 = m_{2,6}m_{6,1}; A_3 = m_{2,1}m_{6,1}; A_4 = m_{8,3}m_{10,3}; A_5 = m_{6,3}m_{11,5}; A_6 = m_{3,6}m_{4,3}; A_7 = m_{2,3}m_{11,5}; A_8 = m_{3,1}m_{4,3}; A_9 = m_{8,3}m_{15,5}; A_{10} = m_{14,3}m_{16,4}; A_{11} = m_{3,3}m_{11,5}; A_{12} = m_{9,3}m_{19,5}; A_{13} = m_{6,5}m_{8,3}; A_{14} = m_{1,5}m_{16,2}m_{19,2}; A_{15} = m_{12,3}m_{13,3}; A_{16} = m_{8,1}m_{8,6}m_{13,3}; A_{17} = m_{15,3}m_{16,5}; A_{18} = m_{12,1}m_{19,2}; A_{19} = m_{16,2}m_{16,4}m_{18,2}m_{18,4}m_{19,2}; A_{20} = m_{16,2}m_{16,4}m_{18,2}m_{19,2}m_{19,4}; A_{21} = m_{16,2}m_{16,4}m_{18,2}m_{18,4}m_{19,4}; A_{22} = m_{16,4}m_{18,2}m_{18,4}m_{19,2}m_{19,4}; A_{23} = m_{16,2}m_{16,4}m_{18,4}m_{19,2}m_{19,4}; A_{24} = m_{12,3}m_{18,5}$	24	$A_1 = m_{16,3}m_{19,1}; A_2 = m_{2,5}m_{19,3}; A_3 = m_{9,3}m_{19,3}; A_4 = m_{7,3}m_{18,3}; A_5 = m_{5,3}m_{17,3}; A_6 = m_{5,3}m_{18,3}; A_7 = m_{13,3}m_{19,3}; A_8 = m_{1,5}m_{2,5}; A_9 = m_{13,3}m_{18,3}; A_{10} = m_{11,5}m_{17,3}; A_{11} = m_{2,5}m_{10,5}; A_{12} = m_{11,5}m_{19,1}; A_{13} = m_{2,5}m_{15,5}; A_{14} = m_{2,5}m_{6,3}; A_{15} = m_{4,5}m_{11,5}; A_{16} = m_{11,5}m_{19,3}; A_{17} = m_{11,2}m_{19,3}; A_{18} = m_{9,3}m_{18,1}m_{18,6}; A_{19} = m_{5,3}m_{13,3}; A_{20} = m_{10,5}m_{18,3}; A_{21} = m_{15,3}m_{18,3}m_{19,3}; A_{22} = m_{8,5}m_{16,3}; A_{23} = m_{13,5}m_{18,3}; A_{24} = m_{2,5}m_{7,1}$	24

由于人脸特征的多样性,描述各民族人脸主要特征的语义并不是唯一的。以表 4 中的人脸覆盖率“ $65\% \geq \eta \geq 60\%$ ”为例,壮族、藏族和维吾尔族人脸特征还包括 $\{m_{1,3}m_{8,5}; m_{2,1}m_{6,1}; m_{9,3}m_{19,3}\}$ 和 $\{m_{9,3}m_{17,2}m_{17,4}m_{19,2}m_{19,4}; m_{9,3}m_{11,2}m_{11,4}m_{16,2}m_{16,4}; m_{2,5}m_{4,5}m_{13,4}\}$ 等。

4.2 人脸典型民族特征及其语义描述

以表 4 中人脸特征覆盖率“ $65\% \geq \eta \geq 60\%$ ”和“ $70\% \geq \eta \geq 65\%$ ”为例,对表述壮族、藏族和维吾尔族人脸典型特征的语义规则进行了相应的语义解释,如表 5~表 8 所示。

由表 5~表 8 中的人脸典型特征及其语义描述

表 5 “ $65\% \geq \eta \geq 60\%$ ”人脸语义规则及其语义描述

语义集	民族	语义规则	规则的语义描述
1	壮族	$A_1 = m_{8,2}m_{17,2}$	“上脸颊不宽且下颧轮廓弧度不大”
	藏族	$A_1 = m_{16,5}m_{17,5}$	“颧骨-眉心角较小且下颧轮廓弧度较小”
	维吾尔族	$A_1 = m_{16,3}m_{19,1}$	“颧骨-眉心角中等且眼角弧度较大”
2	壮族	$A_2 = m_{1,3}m_{8,5}$	“下脸颊中等且上脸颊较小”
	藏族	$A_2 = m_{2,1}m_{6,1}$	“鼻子较宽且面颊较长”
	维吾尔族	$A_2 = m_{9,3}m_{19,3}$	“上脸颊中等且眼角弧度中等”
3	壮族	$A_3 = m_{9,3}m_{17,2}m_{17,4}m_{19,2}m_{19,4}$	“上脸颊中等且下颧轮廓不大且下颧轮廓非中等且眼角弧度不大且眼角弧度非中等”
	藏族	$A_3 = m_{9,3}m_{11,2}m_{11,4}m_{16,2}m_{16,4}$	“上脸颊中等且下脸颊不大且下脸颊非中等且颧骨-眉心角非大且颧骨-眉心角非中等”
	维吾尔族	$A_3 = m_{2,5}m_{4,5}m_{13,4}$	“鼻宽较小且眉间距较小且人中长中等”

表 6 “ $70\% \geq \eta \geq 65\%$ ”壮族人脸语义规则及其语义描述

人脸语义规则	规则的语义描述
$A_1 = m_{8,2}m_{17,2}; A_2 = m_{8,5}m_{17,2}; A_3 = m_{1,3}m_{8,5}; A_4 = m_{9,5}m_{17,5}; A_5 = m_{9,2}m_{19,4}; A_6 = m_{1,3}m_{7,3}; A_7 = m_{9,5}m_{18,5}; A_8 = m_{1,6}m_{17,2}; A_9 = m_{1,1}m_{17,2}; A_{10} = m_{7,3}m_{11,3}; A_{11} = m_{6,3}m_{8,5}; A_{12} = m_{11,3}m_{13,3}; A_{13} = m_{1,1}m_{17,5}$	“上脸颊不宽且下颧轮廓弧度不大”或“左上脸颊较窄且下颧轮廓弧度不大”或“下脸颊中等宽且上脸颊较窄”或“上脸颊较窄且下颧轮廓弧度较小”或“上脸颊不宽且眼角弧度非中等”或“下脸颊中等宽且鼻沟长度中等”或“上脸颊较窄且面颊角较小”或“下脸颊不窄且下颧轮廓弧度不大”或“下脸颊较宽且下颧轮廓弧度不大”或“鼻沟长度中等且下脸颊中等宽”或“面颊长度中等且上脸颊较窄”或“下脸颊中等宽且人中长度中等”或“上脸颊较宽且下颧轮廓弧度较小”

表 7 “70% ≥ η ≥ 65%”藏族人脸语义规则及其语义描述

人脸语义规则	规则的语义描述
$A_1 = m_{16,5} m_{17,5}; A_2 = m_{2,6} m_{6,1};$ $A_3 = m_{2,1} m_{6,1}; A_4 = m_{8,3} m_{10,3};$ $A_5 = m_{6,3} m_{11,5}; A_6 = m_{3,6} m_{4,3};$ $A_7 = m_{2,3} m_{11,5}; A_8 = m_{3,1} m_{4,3};$ $A_9 = m_{8,3} m_{15,5}; A_{10} = m_{14,3} m_{16,4};$ $A_{11} = m_{3,3} m_{11,5}; A_{12} = m_{9,3} m_{19,5};$ $A_{13} = m_{6,5} m_{8,3}$	“颧骨-眉心角较小且下颧轮廓弧度较小”或“鼻宽不窄且面颊长度较大” 或“鼻宽较宽且面颊长度较大”或“上脸颊中等宽且下颧宽中等” 或“面颊长度中等且下脸颊较窄”或“嘴宽不窄且鼻长中等” 或“鼻宽不大且人中较短”或“最宽较宽且眉内间距中等” 或“上脸颊中等且鼻子-眉心角较小”或“上脸颊长度中等且颧骨-眉心角非中等大” 或“嘴宽中等且下脸颊较窄”或“上脸颊中等且眼角弧度较小” 或“面颊长度较小且上脸颊中等宽”

表 8 “70% ≥ η ≥ 65%”维吾尔族人脸语义规则及其语义描述

人脸语义规则	规则的语义描述
$A_1 = m_{16,3} m_{19,1}; A_2 = m_{2,5} m_{19,3};$ $A_3 = m_{9,3} m_{19,3}; A_4 = m_{7,3} m_{18,3};$ $A_5 = m_{5,3} m_{17,3}; A_6 = m_{5,3} m_{18,3};$ $A_7 = m_{13,3} m_{19,3}; A_8 = m_{1,5} m_{2,5};$ $A_9 = m_{13,3} m_{18,3}; A_{10} = m_{11,5} m_{17,3};$ $A_{11} = m_{2,5} m_{10,5}; A_{12} = m_{11,5} m_{19,1};$ $A_{13} = m_{2,5} m_{15,5}$	“颧骨-眉心角中等且眼角弧度较大”或“鼻宽较小且眼角弧度中等” 或“上脸颊中等宽且眼角弧度中等”或“鼻沟长度中等且面颊角中等” 或“鼻长中等且下颧轮廓弧度中等”或“鼻长中等且面颊角中等” 或“人中长中等且眼角弧度中等”或“下脸颊较窄且鼻宽较小” 或“人中长中等且面颊角中等”或“下脸颊较窄且下颧轮廓弧度中等” 或“鼻宽较小且下颧宽较小”或“下脸颊较窄且眼角弧度较大” 或“鼻宽较窄且鼻子-眉心角较小”

可知:(1)当“65% ≥ η ≥ 60%”时,壮族、藏族和维吾尔族的人脸典型特征集中于“上脸颊”、“下脸颊”、“鼻子”、“下颧轮廓弧度”、“颧骨-眉心角”以及“眼角弧度”等特征,即这些人脸特征可以表达壮族、藏族和维吾尔族等民族的人脸差异;(2)当“70% ≥ η ≥ 65%”时,刻画壮族、藏族和维吾尔族的人脸典型特征的个数增多,使用较多的特征描述壮族、藏族和维吾尔族之间的民族人脸特征差异;(3)文中挖掘的语义规则,不仅揭示了不同民族间人脸特征的差异性和相似性,也展示了更多各民族人脸面部的隐性特征,并且规则的语义解释是对各民族人脸典型特征的自然语言描述,便于对不同民族人脸特征进行直观认知。

4.3 基于人脸语义规则集的民族人脸判别

由前面论述可知,本文方法在人脸民族特征的语义抽取、约简及挖掘和人脸典型人脸语义的描述上取得了较好的效果,更进一步地,将本文方法单纯作为语义规则分类器,可在不同数据集上与常用分类器进行比较。

首先采用本文作者建立的多民族人脸数据库 V1.0^[19-21],选取关于壮族、藏族和维吾尔族女性人脸中性表情图像,每个民族包含 200 幅人脸中性表情图像,共 600 幅人脸图像.为了全面比较,由各民族交替组成不同数据集,采用本文方法挖掘各民族的人脸语义规则集;其次,将人脸语义规则集作为分类器,计算测试集中样本的隶属度得出分类结果.例如壮族样本 x_i 和非同类样本 x_j ,在壮族的语义规则描述下,如果隶属度 $\mu(x_i) > \mu(x_j)$,则 x_i 属于壮族.将上述结果与决策树 C4.5^[27]、Quest^[28]、Decision-Table^[29] 以及 NeuralNet^[30]、BayesNet^[31]、SVM^[32]、Relative Attributes(RA)^[33] 等分类方法从平均判别率“ A_T ”和规则的平均深度“ D_E ”等方面进行比较分析, A_T 和 D_E 是 10 次分类结果的平均值;NeuralNet 采用反馈神经网络(Bp)和径向基神经网络(Rbf);SVM 的核函数分别选择径向基核函数(Rbf)、线性核函数(Linear)以及 Sigmoid 核函数。

由表 9 的实验结果可知:(1)根据本文提出的

表 9 中华多民族人脸数据集的判别率

分类器	壮族-藏族		壮族-维吾尔族		藏族-维吾尔族		壮族-藏族-维吾尔族	
	A_T	D_E	A_T	D_E	A_T	D_E	A_T	D_E
本文方法	87.50	6.00	80.16	5.70	80.33	5.60	69.67	5.87
RA	72.72	—	69.11	—	69.11	—	67.67	—
C4.5	82.17	6.80	76.34	7.20	78.57	9.00	59.89	11.40
Quest	84.14	4.00	70.28	4.60	62.27	5.20	61.52	5.00
DecisionTable	83.33	—	76.17	—	59.17	—	55.22	—
NeuralNet(Bp)	88.33	—	72.79	—	77.36	—	72.86	—
NeuralNet(Rbf)	87.59	—	74.21	—	72.64	—	71.86	—
BayesNet	79.83	—	76.00	—	55.93	—	59.11	—
SVM(Rbf)	91.30	—	78.07	—	74.07	—	75.72	—
SVM(Linear)	90.07	—	68.50	—	73.64	—	69.67	—
SVM(Sigmoid)	48.29	—	49.22	—	52.64	—	32.90	—

注:“—”表示未观察到此算法规则深度(下同)。

语义规则对于判别个体的民族属性具有较好的效果,而且生成的语义规则(如表 5~表 8 中所示)能够对不同民族的人脸几何形态进行直观描述,并展示了壮族、藏族和维吾尔族人脸特征的差异性和相似性;(2)在壮族-维吾尔族和藏族-维吾尔族数据集中,本文方法的判别率最高,壮族-藏族和壮族-藏族-维吾尔族数据集中,本文方法的判别率虽然略低于部分分类器,但其仍能够有效地判断个体民族属性;(3)本文算法的判别率均优于 RA 和 C4.5,虽然规则深度略高于 Quest,但在 4 个数据集上的正确判别率均高于 Quest 方法。

为了进一步比较,使用 FEI 人脸数据库^[34-35]和

CK+数据库^[36]对本文方法进行验证. FEI 人脸数据库中包含了 200 个巴西人的 2800 幅人脸图像; CK+数据库包含了 123 个人的表情图像. 基于研究不同民族人脸特征的目的,文中选取 FEI 库中的人脸中性表情图和 CK+库中美国白人女性、美国白人男性和非洲裔女性的人脸中性表情图像,构建巴西男性-巴西女性(FEI-FEI)、美国白人男性-美国白人女性(AME-AME)、巴西男性-巴西女性-美国白人女性(FEI-FEI-AME)和巴西女性-美国白人女性(FEI-AME)、美国白人女性-非洲裔女性(AME-AFR)等组合数据集,对本文及其他方法进行验证比较,结果如表 10 所示.

表 10 FEI 与 CK+人脸组合数据集的判别率

分类器	FEI-FEI		AME-AME		FEI-FEI-AME		FEI-AME		AME-AFR	
	A_T	D_E	A_T	D_E	A_T	D_E	A_T	D_E	A_T	D_E
本文方法	88.00	6.00	71.33	6.00	75.25	6.00	85.20	6.00	83.08	6.00
C4.5	69.67	6.60	71.33	4.60	60.75	9.40	78.00	5.00	76.92	4.40
Quest	65.67	3.40	65.33	2.00	58.50	4.60	77.60	2.80	81.54	2.20
RA	61.27	—	61.33	—	52.40	—	71.40	—	72.23	—
DecisionTable	70.00	—	72.00	—	66.75	—	76.80	—	79.23	—
NeuralNet(Bp)	76.33	—	81.33	—	71.50	—	80.00	—	80.00	—
NeuralNet(Rbf)	72.00	—	75.33	—	68.00	—	80.40	—	79.23	—
BayesNet	71.00	—	72.00	—	66.00	—	80.00	—	83.08	—
SVM(Rbf)	75.67	—	75.40	—	69.75	—	80.00	—	76.92	—
SVM(Linear)	77.67	—	71.33	—	70.25	—	76.40	—	79.23	—
SVM(Sigmoid)	53.33	—	60.67	—	47.25	—	65.20	—	76.92	—

由表 10 中实验结果可知,通过 FEI 人脸和 CK+人脸构建的数据集,进一步验证了本文提出的方法的可行性;本文方法在 FEI-FEI、FEI-FEI-AME、FEI-AME、AME-AFR 等 4 个数据集上的判别率最高,在 AME-AME 数据集上的判别率略低,但与 C4.5 等多数方法的判别率相近,能够较好的判别个体所属的民族;同时本文方法的规则深度和 C4.5 相近,虽然略高于 Quest 方法,但判别率要均高于 Quest 方法。

通过上述比较可知:(1)基于 AFS 构建的逻辑运算规则,可以对描述人脸特征的几何形态语义进行逻辑运算,且挖掘出刻画多民族人脸特征的语义规则;(2)产生规则具有较好的自然语言解释性,例如壮族的人脸语义规则“ $A_1 = m_{8,2} m_{17,2}$ ”对应的解释为“左上脸颊不宽且下颚轮廓弧度不大”等;(3)利用人脸特征数据的分布属性,建立描述多民族人脸特征形态的语义,不受传统的模糊隶属度函数约束,能够客观、真实地表述各民族人脸特征及其之间差异。

与其他分类器相比,如 SVM、BayesNet 以及

NeuralNet 等产生的规则不可观察,且不具有语义解释性;C4.5, Quest, DecisionTable 和 RA 等方法产生的规则的自然语义解释性与之本文方法较弱,且不是建立在语义运算之上的。

现采用本文方法提取的语义规则作为分类器,不仅对个体的民族属性识别率具有较好效果,在对各民族人脸特征的语义解释性则优于其他分类器。

5 总 结

本文提出了一种利用人脸特征的分布属性提取人脸语义、刻画多民族人脸特征间相似性和差异性的方法. 该方法利用人脸特征数据的分布属性,在 AFS 框架下建立描述多民族人脸几何形态的语义,并通过语义逻辑运算获取表达人脸多样性特征的语义规则,根据建立的语义挖掘方法提取不同民族人脸特征的语义规则集. 本文所提方法有以下几个特点:(1)利用人脸特征数据的分布属性提取人脸特征语义;(2)基于 AFS 框架,语义可以进行逻辑运算,进而得到描述人脸复杂特征的语义;(3)所获语

义规则有较好的自然语言解释,能够较好表达不同民族间人脸特征的差异,且易于理解;(4)依据语义权重及语义贴进度的关联关系建立约简准则,获取多民族人脸主要特征语义规则。文中以作者的“多民族人脸数据库”为对象,对不同人脸覆盖率下的多民族人脸主要特征语义规则进行了挖掘,并对其进行了相应的语义解释。结果表明,本文方法在多民族人脸特征语义提取、民族人脸语义表达以及人脸主要特征挖掘等方面具有较好的效果,对于刻画多民族人脸特征是可行的。

此外,文中将多民族人脸特征语义规则集作为分类器,与常用的分类器在“多民族人脸数据库”上进行了判别率和规则深度等方面的比较分析,并在 FEI 和 CK+组合构建的人脸特征数据集上进行了验证,实验结果显示,对于个体民族属性的判别,本文方法的判别率不仅优于 C4.5、DecisionTable、Quest 和 BayesNet 等多数分类器,且规则深度也与 C4.5 和 Quest 等分类器接近,但对于规则的语义解释要优于其他分类器,且能够直观地反映多民族间人脸特征的差异。

文中方法仍具有很好的扩展能力。由于人脸几何形态特征的多样性,未来工作中可进一步丰富描述人脸几何形态的特征,同时根据产生的多民族人脸特征的语义规则集,设计和完善约简方法,以便更加准确分析、精确刻画多民族的差异性和相似性。

致 谢 感谢审稿人和编辑提出的宝贵意见!

参 考 文 献

- [1] Bruce V, Young A. Understanding the face recognition. *British Journal of Psychology*, 1986, 77(3): 305-327
- [2] Macrae C N, Bodenhausen G V. Social cognition: Thinking categorically about others. *Annual Review of Psychology*, 2000, 51(1): 93-120
- [3] Fu Si-Yao, He Hai-Bo, Hou Zeng-Guang. Learning race from face: A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2014, 36(14): 2483-2509
- [4] Bledsoe W W. Man-Machine Facial Recognition. Palo Alto, USA: Panoramic Research Inc., PRI: 22, 1966
- [5] Kanade T. Computer Recognition of Human Faces [Ph. D. dissertation]. Kyoto University, Japan, 1974
- [6] Brunelli R, Poggio T. Face recognition: Features versus templates. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, 15(12): 1042-1052
- [7] Brooks K R, Gwinn O S. No role for lightness in the perception of black and white? Simultaneous contrast affects perceived skin tone, but not perceived race. *Perception*, 2010, 39(8): 1142-1145
- [8] Zhang Hong-Ming, Zhao De-Bin, Gao Wen. Face detection under rotation in image plane using skin color model, neural network and feature-based face model. *Chinese Journal of Computers*, 2002, 25(13): 1250-1256 (in Chinese)
(张洪明, 赵德斌, 高文. 基于肤色模型、神经网络和人脸结构模型的平面旋转人脸检测. *计算机学报*, 2002, 25(13): 1250-1256)
- [9] Akbari R, Mozaffari S. Fuzzy moments method for face recognition in an ethnic database. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 2012, 5(1): 85-97
- [10] Anzures F, Pascalis O, Quinn P C, et al. Minimizing skin color differences does not eliminate the own race recognition advantage in infants. *Infancy*, 2011, 16(6): 640-654
- [11] Turk M, Pentland A. Eigenfaces for recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1991, 3(1): 71-86
- [12] Levine D T. Classifying faces by race: The structure of race categories. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 1996, 22(6): 1364-1382
- [13] Ahmad A, Ashraf A, Walid A S. Arabic race classification of face images. *Journal of Computer Technology*, 2013, 4(2): 234-239
- [14] Yan Yan, Zhang Yu-Jin. State-of-the-art on video-based face recognition. *Chinese Journal of Computers*, 2009, 32(5): 878-886 (in Chinese)
(严严, 章毓晋. 基于视频的人脸识别研究进展. *计算机学报*, 2009, 32(5): 878-886)
- [15] Kumar N, Berg A, Belhumeur P, Nayar S. Describable visual attributes for face verification and image search. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 1962-1977
- [16] Salah S H, Du H, Al-Jawad N. Fusing local binary patterns with wavelet features for ethnicity identification. *Proceedings of IEEE International Conference on Signal Image Process*, 2013, 21(5): 416-422
- [17] Fu Si-Yao, Yang Guo-Sheng, Hou Zeng-Guang. Spiking neural networks based cortex like mechanism: A case study for facial expression recognition//*Proceedings of the IEEE Conference on Neural Network*. San Jose, USA, 2011: 1637-1642
- [18] Ding Hua-Xiong, Huang Di, Wang Yun-Hong, Chen Li-Ming. Facial ethnicity classification based on boosted local texture and shape description//*Proceedings of the 10th IEEE Conference on Workshops on Automatic Face and Gesture Recognition*. Shanghai, China, 2013: 1-6
- [19] Duan X D, Wang C R, Liu X D. Ethnic features extraction and recognition of human faces//*Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Advantage Computer Control*. Shenyang, China, 2010: 125-130

- [20] Duan Xiao-Dong, Wang Cun-Rui, Liu Xiang-Dong, Liu Hui. Minorities features extraction and recognition of human faces. *Computer Science*, 2010, 37(8): 276-279, 301 (in Chinese)
(段晓东, 王存睿, 刘向东, 刘慧. 人脸的民族特征抽取及其识别. *计算机科学*, 2010, 37(8): 276-279, 301)
- [21] Li Ze-Dong, Duan Xiao-Dong, Zhang Qing-Ling. A novel survey based on multiethnic facial semantic web. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 2013, 11(11): 5076-5083
- [22] Zhang Ji-Zong, et al. *The Research of Chinese Physical Anthropology*. Beijing: Science Press, 2010(in Chinese)
(张继宗等. *中国体质人类学研究*. 北京: 科学出版社, 2010)
- [23] Xi Huan-Jiu, et al. *Physical Anthropology*. Beijing: Intellectual Property Publish House, 2012(in Chinese)
(席焕久等. *体质人类学*. 北京: 知识产权出版社, 2012)
- [24] Liu Xiao-Dong. The fuzzy sets and systems based on AFS structure, EI algebra and EII algebra. *Fuzzy Sets and Systems*, 1998, 95(2): 179-188
- [25] Liu Xiao-Dong. The fuzzy theory based on AFS algebras and AFS structure. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 1998, 217(2): 459-478
- [26] Liu X, Pedrycz W. *Axiomatic Fuzzy Set Theory and Its Applications*. Heidelberg: Springer, 2009
- [27] Quinlan J R. *C4.5: Programs for Machine Learning*. The Morgan Kaufmann Series in Machine Learning. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1993
- [28] Yen E, Chu I W M. Relaxing instance boundaries for the search of splitting points of numerical attributes in classification trees. *Information Sciences*, 2007, 177(5): 1276-1289
- [29] Huysmans J, Dejaeger K, Mues C, et al. An empirical evaluation of the comprehensibility of decision table, tree and rule based predictive models. *Decision Support Systems*, 2011, 51(1): 141-154
- [30] Zhang Yu-Nong, Yin Yong-Hua, Guo Dong-Sheng, et al. Cross-validation based weights and structure determination of Chebyshev-polynomial neural networks for pattern classification. *Pattern Recognition*, 2014, 47(12): 949-956
- [31] Wang Zi-Heng, Hope R M, Wang Zuo-Guan, et al. Cross-subject workload classification with a hierarchical Bayes model. *NeuroImage*, 2012, 59(1): 64-69
- [32] Zhu Wen-Xin, Zhong Ping. A new one-class SVM based on hidden information. *Knowledge-Based Systems*, 2014, 60: 35-43
- [33] Parikh D, Grauman K. Relative attributes//*Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Computer Vision*. Barcelona, Spain, 2011: 503-510
- [34] Thomaz C E, Giraldo G A. A new ranking method for principal components analysis and its application to face image analysis. *Image and Vision Computing*, 2010, 28(6): 902-913
- [35] Tenorio E Z, Thomaz C E. Análise multilinear discriminante de formas frontais de imagens 2D de face//*Proceedings of the X Simposio Brasileiro de Automacao Inteligente SBAI*. São João del-Rei, MG, Brasil, 2011: 266-271
- [36] Lucey P, Cohn J E, Kanade T, et al. The extended Cohn-Kanade Dataset (CK+): A complete dataset for action unit and emotion-specified expression//*Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. San Francisco, USA, 2010: 94-101



DUAN Xiao-Dong, born in 1963, Ph. D., professor. His main research interests focus on pattern recognition and data mining, etc.

LI Ze-Dong, born in 1985, Ph. D. candidate. His research interests include data mining and fuzzy control, etc.

WANG Cun-Rui, born in 1980, Ph. D. candidate, associate professor. His research interests include data mining and pattern recognition, etc.

ZHANG Qing-Ling, born in 1956, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His main research interests include network control and biomathematics.

LIU Xiao-Dong, born in 1963, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His main research interests include data mining and pattern recognition.

Background

This research belongs to pattern recognition field. Many methods have been constructed to analyze ethnic features. There are two main ways, one is to scale facial features using metrics tool by anthropologist, another is to utilize computer vision by computer scientists. Anthropologists give distribution of facial features among multi-ethnic groups according to data

and computer scientists can also distinguish the ethnic utilizing the image features of overall, locality and invariance etc. But, they ignore the geometrical features, which can intuitively express the differences among multi-ethnic groups. Many scholars try to recognize the face using geometrical features, the result shows that the accuracy is

lower and their relations are too complex to set function. Then, the geometrical features are usually used to analyze the shape change of facial parts. However, these ways do not pay more attention on facial geometrical features.

In past research, we have get some achievements as collecting face images, locating facial features and analyzing multi-ethnic facial features etc., while we obtain national patents of computers software as analysis platforms. We also gained many research funds, such as, National Science Foundation, State Nationalities Affairs Commission and Liaoning S&T etc.

In this paper, we combine fuzzy theory and facial geometrical features to extract semantic rules to describe facial features of multi-ethnics. While we have extracted the semantic rules on facial features and distinguished ethnic of

each private.

In our way, there two advantages. First, the rules don't need precise model, and they are built according to the distribution of facial geometrical features data. Second, the rules are not unique, they have different explains by private habit. In addition, due to the interpretability of semantic rules, they can use as a classifier to classify multi-ethnics. This work effectively summarizes the facial features of multi-ethnic as Tibetan, Uygur and Zhuang, and converts the human's perceive to semantic rules. Then, the semantic rules are easy to understand.

This work is important significant to protect the national culture, it can supply data and rules for the multi-ethnic image design and other industry.